

В.И. БУТЕНКО;
О.С. ДРУЙ;
Б.И. ИВАНОВ, канд. физ-мат. наук;
В.О. ИЛЬИЧЕВА;
Н.Г. ШУЛИКА, канд. физ-мат. наук;
О.Н. ШУЛИКА, канд. физ-мат. наук;
В.Б. ЮФЕРОВ, д-р. техн. наук;
Е.В. РЫБАС

РАЗРАБОТКА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ ЛИНЗ ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКОВ ЛЕГКИХ ИОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ПОРЯДКА 10 МЭВ

Надпровідні магнітні лінзи можуть бути застосовані як для радіального фокусування іонів у процесі прискорення, так і для фокусування іонних пучків, прискорених до значних енергій. Розробка таких лінз ведеться в Інституті плазменної електроніки й нових методів прискорення ННЦ ХФТІ НАНУ. Розроблено комп'ютерні програми для розрахунку фокусування широкоапертурних інтенсивних іонних пучків, на основі яких проведена оптимізація лінз. З обліком наявного практичного досвіду по виготовленню надпровідних соленоїдів, виконані інженерні розрахунки й ескізний проект надпровідних магнітних лінз для фокусування пучків дейтронів з енергією до 20 МэВ.

Сверхпроводящие магнитные линзы могут быть применены как для радиального фокусирования ионов в процессе ускорения, так и для фокусирования ионных пучков, ускоренных к значительным энергиям. Разработка таких линз ведется в Институте плазменной электроники и новых методов ускорения ННЦ ХФТІ НАНУ. Разработаны компьютерные программы для расчета фокусирования широкоапертурных интенсивных ионных пучков, на основе которых проведенная оптимизация линз. С учетом имеющегося практического опыта по изготовлению сверхпроводящих соленоидов, выполненные инженерные расчеты и эскизный проект сверхпроводящих магнитных линз для фокусирования пучков дейтронов с энергией до 20 МэВ.

Введение. Сверхпроводящие (СП) магнитные линзы (в виде коротких соленоидов) могут быть применены как для радиальной фокусировки ионов в процессе ускорения, так и для фокусировки ионных пучков, ускоренных до значительных энергий. Применение цилиндрических линз известно для фокусировки пучков заряженных частиц малых энергий. Однако, с повышением энергии частиц, требуются большие величины магнитных полей, поскольку фокусное расстояние тонкой линзы (длина линзы существенно меньше фокусного расстояния) определяется соотношением [1]:

$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8mU} \int_{-\infty}^{+\infty} B^2(z) dz,$$

где B – магнитная индукция, U – ускоряющий потенциал, e и m – заряд и масса частицы.

Для энергий порядка 10 МэВ нужны величины магнитного поля на уровне 5 Тл, что требует применения СП линз. На практике для таких целей СП линзы применяются редко. В частности, в [2] описаны результаты применения длинного СП соленоида для обеспечения радиальной устойчивости пучка протонов в процессе ускорения в линейном ускорителе протонов СИУ-1 (МРТИ). В результате такого применения получен ток пучка около 400 мА, но при значительном разбросе частиц по энергиям. В то же время авторы [2] отмечают, что не достигли расчетных параметров системы. В [3] для реализации мощных линейных ускорителей ионов предложена схема на основе модифицированной переменного-фазовой фокусировки, в которой для согласования секций применяются короткие СП соленоиды с напряженностью магнитного поля в несколько тесла. Результаты компьютерного моделирования ускорения дейтронов в таком ускорителе [3] показывают целесообразность предложенного подхода.

Компьютерное моделирование фокусировки дейтронов. В работе путем компьютерного моделирования проведены расчеты фокусировки широкоапертурных ионных пучков, на основе которых проведена оптимизация линз по минимуму фокусного расстояния в следующих случаях: 1) по соотношению длины и толщины намотки, 2) по минимальной длине СП провода (рис. 1-4).

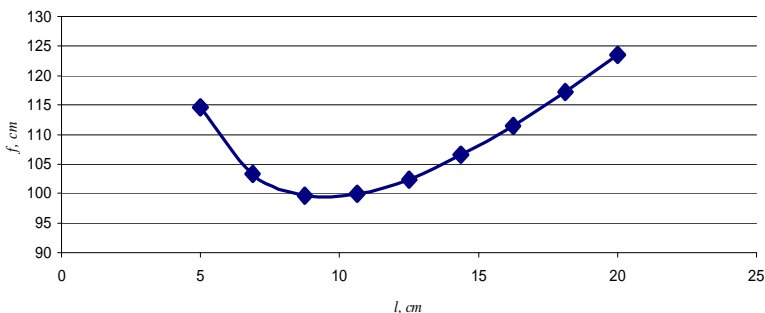


Рис. 1. Фокусировка параллельного пучка дейтронов с энергией 20 МэВ (вариант 1)

На рис. 1 представлены результаты оптимизации линзы по минимуму фокусного расстояния при постоянной площади сечения намотки (внутренний радиус 4 см, наружный радиус и длину требуется определить, сечение

намотки 45 см^2 , средняя плотность тока 15614 А/см^2 . Выбрано: длина линзы 10 см , наружный радиус около $8,5 \text{ см}$, при этом фокусное расстояние равно 98 см , напряженность магнитного поля в центре линзы $H_{00} = 57,668 \text{ кЭ}$.

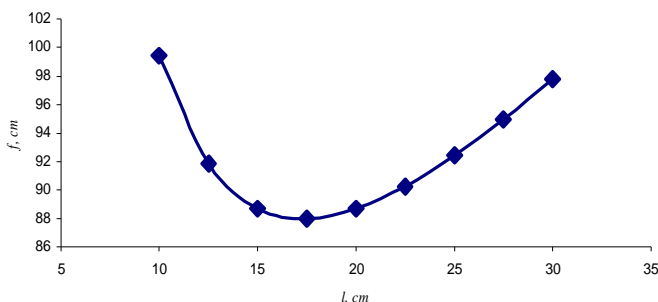


Рис. 2. Фокусировка параллельного пучка дейтронов с энергией 20 МэВ (вариант 2).

На рис. 2 представлены результаты оптимизации линзы по минимуму фокусного расстояния при постоянной длине провода (внутренний радиус линзы $3,5 \text{ см}$, наружный радиус и длину требуется определить, средняя плотность тока 15614 А/см^2 , длина провода $2,87 \text{ км}$ – такая же, как для рис. 1). В результате такой оптимизации при длине линзы $17,5 \text{ см}$ фокусное расстояние уменьшилось с 98 до 88 см .

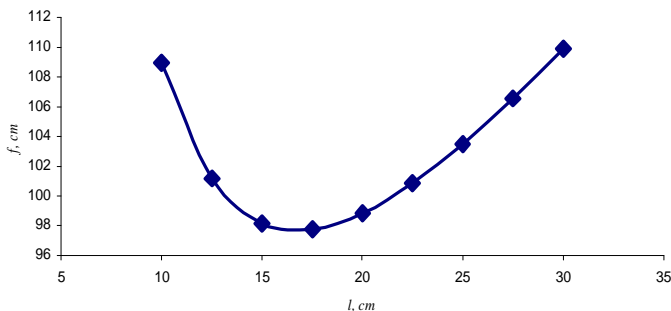


Рис. 3. Фокусировка параллельного пучка дейтронов с энергией 20 МэВ (вариант 3)

На рис. 3 представлены результаты оптимизации линзы по минимуму длины провода при сохранении фокусного расстояния (внутренний радиус $3,5 \text{ см}$, наружный радиус и длину требуется определить, средняя плотность тока 15614 А/см^2). При длине линзы 17 см , фокусном расстоянии 98 см (таком же, как на рис. 1) получили длину провода $2,67 \text{ км}$, то есть на 200 м меньше по сравнению с данными рис. 1, 2.

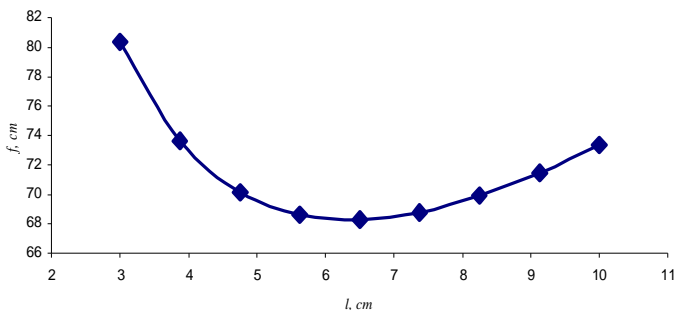


Рис. 4. Фокусировка параллельного пучка дейтронов с энергией 3 МэВ

На рис. 4 представлены результаты оптимизации линзы по минимуму фокусного расстояния при постоянной площади сечения намотки линзы (внутренний радиус 3,0 см, сечение намотки 18 см^2 , наружный радиус и длину требуется определить, средняя плотность тока 15614 А/см^2). В результате оптимизации выбрано: длина линзы 6 см, наружный радиус 6 см. Напряженность магнитного поля в центре линзы $H_{00} = 33 \text{ кЭ}$.

После выбора оптимальных параметров соленоидальных СП линз был проведен расчет фокусировки широкоапертурного пучка дейтронов с энергией 20 МэВ с начальными условиями, соответствующими результатам предварительно проведенного компьютерного моделирования линейного ускорителя [3]. Результаты представлены на рис. 5.

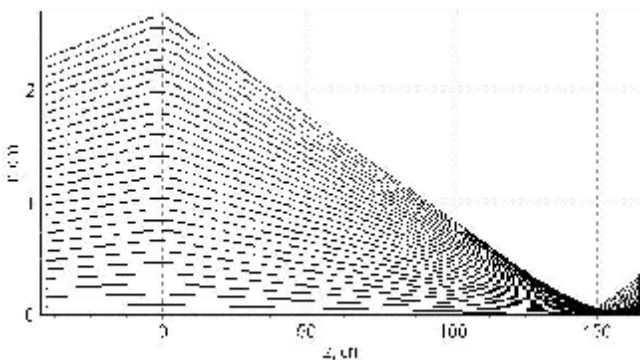


Рис. 5. Фокусировка дейтронов 20 МэВ. Радиус пучка на выходе из ускорителя $r_0 = 2,3 \text{ см}$, угол разлета $= 10 \text{ мрад} \cdot r/r_0$. Рассчитаны траектории дейтронов в линзе с параметрами: внутренний радиус 4 см, длина 10 см, наружный радиус около 8,5 см при средней плотности тока 15614 А/см^2 . Напряженность магнитного поля в центре линзы $H_{00} = 57,7 \text{ кЭ}$.

Как видно из рис. 5, фокус непараксиальных и слегка расходящихся лу-

чей находится в области $z = 157-160$ см. Отметим, что для параллельных параксиальных лучей фокусное расстояние в данном случае составляет около 100 см, что следует как из компьютерного моделирования, так и из расчета по формуле (1). Минимальный радиус пучка, или кроссовер, который в данном случае определяется непараксиальностью пучка (поскольку траектории частиц с большим радиусом инжекции преломляются сильнее), составляет 0,08 см при $z = 150$ см.

На рис. 6, 7 приведено распределение относительной плотности тока дейтронов по радиусу в фокальной плоскости и в области кроссовера.

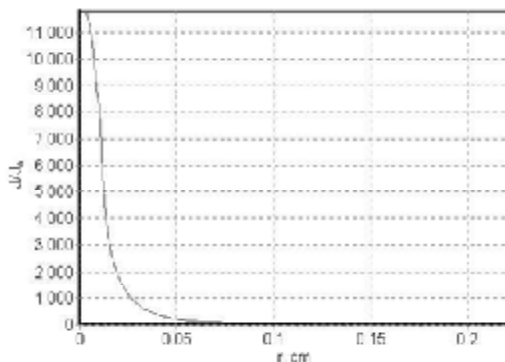


Рис. 6. Распределение относительной плотности тока дейтронов по радиусу в фокальной плоскости

Максимальная относительная плотность тока дейтронов на оси при $z = 157,8$ см составляет 11500. В основном она определяется параксиальными лучами.

При большой плотности мощности пучка мишень (полоска фольги) по мере облучения должна перематываться с катушки на катушку, либо располагаться на внешнем крае вращающегося диска, плоскость которого перпендикулярна пучку.

На рис. 8 представлена схема облучения дейтронами образца в специальной камере, обеспечивающей радиационную безопасность.

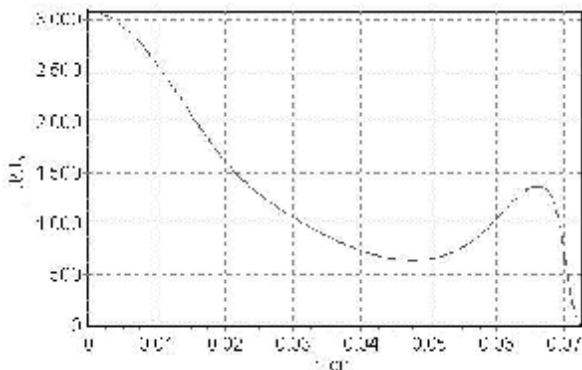


Рис. 7. Распределение относительной плотности тока дейтронов по радиусу в области минимального сечения пучка

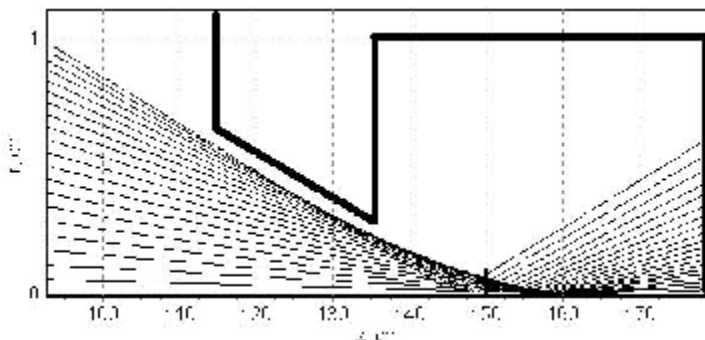


Рис. 8. Прием пучка на мишень в радиационно экранирующей камере («минимогоильнике»)

При среднем радиусе входного отверстия 0,5 см максимальная толщина передней защитной стенки составляет 20 см. Реально внутренние границы радиационно экранирующей камеры должны быть существенно больше, чем показано на рисунке, — для значительного уменьшения потока вторичной радиации через входное отверстие. На рис. 8 мишень расположена в кроссовере пучка. В зависимости от среднего тока пучка и оптимального времени экспозиции, можно выбрать размеры и место расположения мишени после кроссовера, а переднюю защитную стенку поставить в области кроссовера, тем самым уменьшив выход вторичной радиации через отверстие для входа пучка.

Разработка эскизного проекта сверхпроводящих магнитных линз

Определение параметров СП линз. В предлагаемом нами случае для двух ускорителей дейтронов с энергиями: 1-5 МэВ и 20 МэВ фокусирующая система независима от ускоряющей, и ее свойства задаются величиной маг-

нитного поля Н фокусирующего магнита. Как указывалось, фокусирующие системы такого типа могут быть применены для ускорителей с энергией 10-20 МэВ при величинах магнитного поля 5-10 Тл, снимая некоторые проблемы, которые появляются при использовании квадрупольных линз. Следует заметить, что в отличие от тепловых магнитов, для сверхпроводящих систем энергия, потребляемая магнитом, не зависит от величины магнитного поля, а зависит только от габаритов магнитной системы и слабо зависит от ее весовых параметров, поскольку нет внутреннего тепловыделения, а есть теплоподвод через внешнюю границу и токовводы.

Основные требования к СП соленоидам-линзам перечислены ниже. Фокусирующий соленоид для дейтронов с энергией 1-5 МэВ должен иметь следующие параметры: вакуумное отверстие диаметром 80 мм с температурой стенок 300 К для прохождения пучка, внутренний радиус соленоида – 50 мм. Внешний радиус соленоида не регламентирован и будет определен при выборе плотности тока. Длина соленоида 60 мм, магнитное поле на оси в середине соленоида до 3,3 Тл. Фокусирующий соленоид для дейтронов с энергией 20 МэВ имеет параметры: вакуумное отверстие диаметром 80 мм с температурой стенок 300 К для прохождения фокусируемого пучка, внутренний радиус соленоида – 50 мм, внешний радиус соленоида также не регламентирован и будет определен расчетным путем. Длина соленоида – 100 мм, магнитное поле на оси, в середине катушки 5,6 Тл. Исходя из величин магнитных полей, до 10 Тл, материалом обмотки может быть кабель НТ-50. Более подробные характеристики различных типов кабеля представлены в табл. 1.

При анализе траекторий частиц в области фокусирующей СП линзы не зафиксированы траектории, выходящие на стенки канала, поэтому для данного случая нет необходимости учитывать радиационно зависимые характеристики сверхпроводящих материалов.

Таблица 1 – Параметры кабеля МНТ-0.57-109, NbTi Cu 1-0.75 и кабеля НТ-50УК

МНТ-50-0,57-109 NbTi/Cu==1/1,22	Диаметр, мм	Критический ток, А					
		4 Т	5 Т	6 Т	7 Т	8 Т	9 Т
	2.0		2800	2300	1800	1500	1200
	1.0		850	700	580	480	300
	0.7		550	450	360	230	190
	0.5		220	190	165	125	95
НТ-50-1.5УК	1.5	470	450	350			

Требования и выбор конструкции и параметров СП линз. Рассмотрены "лабораторный" и "промышленный" варианты изготовления и эксплуатации криогенного обеспечения СП магнитных линз. "Промышленный" вариант требует длительной, максимально автоматизированной эксплуатации при определенных капитальных затратах. "Лабораторный" вариант требует отно-

сительно меньших капитальных затрат при коротком периоде эксплуатации, т.е. не требуется особо минимизировать теплоподводы за счет стоимости изготовления и последующей кратковременной эксплуатации. Для обоих этих случаев конструктивные решения оказываются различными. Соленоид для ускорителя 1-5 МэВ следует отнести к классу "лабораторных" соленоидов с указанными выше требованиями. Длительность эксперимента – 1-5 суток, возможные хладагенты – жидкие азот и гелий. Соленоид 20 МэВ ускорителя следует отнести к классу "промышленных" соленоидов, требующих минимального обслуживания при круглосуточной эксплуатации в течение года, хотя возможна его работа и в "лабораторном" режиме.

Конструкция криогенной системы для линзы "лабораторного" типа выполнена с использованием емкостей с жидкими гелием и азотом и охлаждаемыми газообразным отходящим гелием тоководами. Здесь возможен подвариант с использованием высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) тоководов на уровень температур около 80-105 К (стоимость около \$100 за 1 кА·м).

На рис. 1 представлен схематический вид криосистемы СП соленоида "лабораторного" типа.

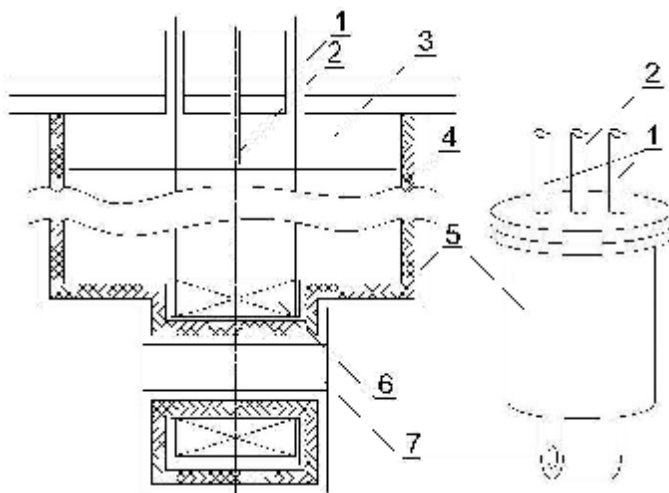


Рис. 9. Схематический вид криосистемы соленоида: 1 – тоководы соленоида, 2 – переливалка для залива жидкого гелия, 3 – объем с жидким гелием или область размещения криогенератора, 4 – слоистая вакуумная теплоизоляция или азотный экран, 5 – корпус дьюара или криогенератора, 6 – соленоид, 7 – отверстие для ввода пучка

В табл. 2 представлены расчетные параметры СП магнитных линз для фокусировки широкоапертурных интенсивных ионных пучков с энергиями 20 МэВ (5,5 Т) и 5 МэВ (3,3 Т).

Таблица 2

Геометрия соленоидов	$2a_1 = 100$ мм, $2a_2 = 300$ мм,	$2a_1 = 100$ мм, $2a_2 = 250$ мм,
----------------------	-----------------------------------	-----------------------------------

	$l = 100 \text{ мм}, \alpha = 3,0, \beta = 1,0$	$l = 60 \text{ мм}: \alpha = 2,5, \beta = 0,6$
H_{\max}/H_0	6,65/5,8	4,3/3,3
Кабель(мм)	НТ-50 ($\varnothing=1,5$)	НТ-50 ($\varnothing=1,5$)
Число витков	3500	1575
Транспортный ток (А)	280	300
Плотность тока (А/см ²)	$1,4 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$
Длина провода (м)	2200	865

Расчет магнитного поля на оси линзы проводился по формуле [4]:

$$H_0 = \frac{NI}{a_1} \frac{1}{2\beta(\alpha - 1)} F(\alpha, \beta) \quad F(\alpha, \beta) = 0,4\pi\beta \ln \frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}}{1 + (1 + \beta^2)^{1/2}},$$

где N – число витков, I – ток в соленоиде, a_1 и a_2 – внутренний и внешний радиусы соленоида, $\alpha = a_2/a_1$, $\beta = b/a_1$, $l = 2b$ – длина соленоида, $F(\alpha, \beta)$ – форм-фактор.

Определение теплоподводов. Для расчета тепловых характеристик используется уравнение теплового баланса: $Q = \Sigma Q_j$ Здесь Q_1 – теплоподвод к поверхности магнита за счет: теплового излучения, эквивалент величины σT^4 ; Q_2 – теплоподвод по подвесам и опорам – эквивалент уравнения Фика – $\Sigma \lambda_i \Delta T s_i / l_0$, где λ_i – теплопроводности материалов при использовании комбинированных опор, ΔT – разность температур, s_i – сечения различных материалов, теплоизоляторов в комбинированной опоре, l_0 – длина опоры; Q_3 – теплоподвод по тоководам, который пропорционален квадрату тока, I^2 , удельному сопротивлению материалов – ρ , геометрическим параметрам тоководов, r , l , – радиусу и длине токовода, коэффициентам теплопередачи от холодного газообразного гелия к деталям тоководов – σ .

Для "лабораторной" и "промышленной" системы охлаждения СП-линз получаем разные значения теплоподводов и теплопотерь и, соответственно, разные конструкции. Нагрузкой является собственно соленоид, с $T = 4 \text{ К}$ и внешней поверхностью, $S \approx 1,1 \cdot 10^3 \text{ см}^2$. При использовании слоисто-вакуумной изоляции без охлаждаемого жидким азотом экрана, радиационный теплоподвод к такой системе может быть получен на уровне 10^{-2} Вт . Охлаждаемые протоком газообразного гелия оптимизированные тоководы дают теплоподвод на уровне $(7-10) \cdot 10^{-4} \text{ Вт/А}$, т.е. при токе до 500 А, теплоподвод к соленоиду будет менее 1,0 Вт, что соответствует испарению LHe 1,7л/час, т.е. приблизительно $\approx 40 \text{ л/сутки}$. Танк-дьюар такого объема имеет поверхность около $1,0 \cdot 10^4 \text{ см}^2$ и, соответственно, теплоприток на уровне 0,1 Вт.

Второй вариант охлаждения магнитных линз выполняется с использованием двухуровневых криогенераторов на температуру 4 К и 80 К с обязательным использованием ВТСП тоководов.

При работе с криогенератором нет отходящих паров гелия, и тоководы

не могут охлаждаться потоком газообразного гелия, и поэтому охлаждаются только с одного конца. Использование ВТСП –токовводов с критической температурой 80-105 К позволяет не иметь тепловыделений в системе соленоида и токовводов вплоть до температур экрана, т.е. 80-100 К. Теплоподвод по токовводам идет из области с температурой 300 К на поверхность с $T = 80$ К и составляет около 20 Вт, который должен сниматься первой ступенью криогенератора с температурой 80-105 К. Теплоприток в зону 4 К из-за малой величины теплопроводности ВТСП-материала лежит на уровне 0,1-0,2 Вт и снимается второй ступенью криогенератора.

Первый вариант системы. Стоимость системы СП-соленоида ~20 тыс. у.е., обмотка – материал сп НТ-50 + ВТСП – 2,5 тыс у.е., эксплуатация в течение года, т.е. стоимость жидкого гелия, без учета фонда оплаты труда, фот, – 50 тыс у.е.

Второй вариант системы. Стоимость соленоида и системы – 10 тыс у.е. Криогенератор 50 тыс у.е.

Выводы. В работе путем компьютерного моделирования приведены расчеты фокусировки широкоапертурных ионных пучков, на основе которых проведена оптимизация линз по минимуму фокусного расстояния и определены траектории фокусируемых ионов дейтерия с энергией 20 МэВ.

Рассмотрены параметры СП магнитных линз для фокусировки широкоапертурных интенсивных ионных пучков с энергиями 20 МэВ (5,5 Т) и 5 МэВ (3,3 Т), и представлены варианты криогенного обеспечения.

Работа доложена на XX Международном семинаре по ускорителям заряженных частиц (Алушта, Крым, 9-15 сентября 2007 г.).

Список литературы: 1. *Н.С. Зинченко.* Курс лекций по электронной оптике. Издательство ХГУ, Харьков, 1958, 275 с. 2. *В.М. Пироженко, О.В. Плинка.* Линейный ускоритель протонов с фокусировкой пучка сверхпроводящим соленоидом и ускорением в резонаторе со встречными вибраторами // Вопросы атомной науки и техники, сер. Ядерно-физические исследования, 1989, вып. 6, с. 30-33. 3. *В.И. Бутенко, О.С. Друй, Б.И. Иванов, Н.Г. Шулика, О.Н. Шулика, В.Б. Юферов, В.О. Ильичева.* Применение сверхпроводящих соленоидов для согласования секций в линейных ускорителях // Тезисы XX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц (Алушта, Крым, 9-15 сентября 2007 г.), с. 111-112. Издательство ННЦ ХФТИ, Харьков, 2007. 4. *Д. Монтгомери.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М.: "Мир", 1971г, 355 с.

Поступила в редколлегию 15.10.07